

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-204859

(43) 公開日 平成11年(1999) 7月30日

(51) IntCl<sup>5</sup>

H 0 1 S 3/07  
3/10  
3/17

識別記号

F I

H 0 1 S 3/07  
3/10  
3/17

Z

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号 特願平10-6970

(22) 出願日 平成10年(1998) 1月16日

(71) 出願人 000004226

日本電信電話株式会社  
東京都新宿区西新宿三丁目19番2号

(72) 発明者 西田 好敏

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本  
電信電話株式会社内

(72) 発明者 山田 誠

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本  
電信電話株式会社内

(72) 発明者 金森 照寿

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本  
電信電話株式会社内

(74) 代理人 弁理士 谷 義一 (外1名)

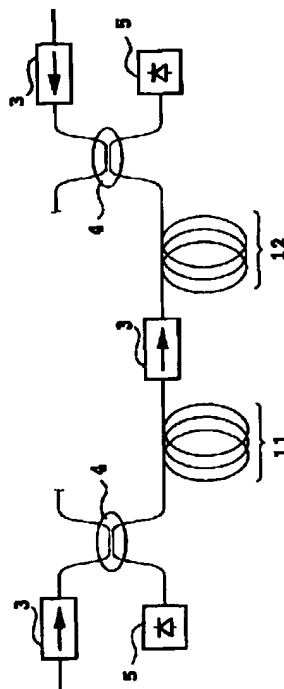
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ファイバ増幅器

(57) 【要約】

【課題】 低雑音で広帯域な光ファイバ増幅器を提供する。

【解決手段】 希土類イオンが添加された複数の光増幅用ファイバが直列または並列に接続された構成を有する光ファイバ増幅器において、前記光増幅用光ファイバを、フッ化物光ファイバ、テルライトファイバ、カルコゲナイドファイバ、石英系ファイバのいずれかから構成する。あるいは、希土類イオンが添加された第1の光増幅用ファイバと第2の光増幅用ファイバとをアイソレータを介して直列に接続し、前記第1の光増幅用光ファイバを信号光の進行方向に対して前記アイソレータの前段に位置させるとともに、前記第2の光増幅用ファイバを前記アイソレータの後段に位置させ、前記第1の光増幅用ファイバをカルコゲナイドファイバあるいはテルライトファイバから構成し、前記第2の光増幅用光ファイバをフッ化物光ファイバから構成する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 希土類イオンが添加された複数の光増幅用ファイバが、直列または並列に接続された構成を有する光ファイバ増幅器において、

前記光増幅用ファイバが、フッ化物物光ファイバ、テルライトファイバ、カルコゲナイドファイバ、石英系ファイバのいずれかからなることを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項2】 希土類イオンが添加された第1の光増幅用ファイバと第2の光増幅用ファイバとがアイソレータを介して直列に接続され、前記第1の光増幅用ファイバは信号光の進行方向に対して前記アイソレータの前段に位置するとともに、前記第2の光増幅用ファイバは前記アイソレータの後段に位置し、前記第1の光増幅用ファイバはカルコゲナイドファイバあるいはテルライトファイバからなり、前記第2の光増幅用ファイバはフッ化物物光ファイバからなることを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項3】 前記希土類イオンがPr, Dy, Ndからなることを特徴とする請求項1または2のいずれかに記載の光ファイバ増幅器。

【請求項4】 前記フッ化物物光ファイバのガラス組成が、原子モル分率で、InF<sub>3</sub>が10～30モル%、GaF<sub>3</sub>が7～30モル%、ZnF<sub>2</sub>が10～19モル%、BaF<sub>2</sub>が4～30モル%、SrF<sub>2</sub>が0～24モル%、PbF<sub>2</sub>が0～30モル%、LaF<sub>3</sub>, YF<sub>3</sub>, GdF<sub>3</sub>, LuF<sub>3</sub>よりなる群から選ばれた少なくとも一種が1.5～10モル%、LiFが1.5～30モル%、NaFが0～30モル%、追加成分が0～15モル%であり、かつこれら組成量の合計が100モル%となっていることを特徴とする請求項1または2のいずれかに記載の光ファイバ増幅器。

【請求項5】 前記フッ化物物光ファイバのガラス組成が、原子モル分率で、InF<sub>3</sub>が5～25モル%、GaF<sub>3</sub>が13～40モル%、ZnF<sub>2</sub>が4～25モル%、PbF<sub>2</sub>が30～46モル%、CdF<sub>2</sub>が0～20モル%、LaF<sub>3</sub>, YF<sub>3</sub>, GdF<sub>3</sub>, LuF<sub>3</sub>よりなる群から選ばれた少なくとも一種が1.5～12モル%、追加成分が0～15モル%であり、かつこれら組成量の合計が100モル%となっていることを特徴とする請求項1または2のいずれかに記載の光ファイバ増幅器。

【請求項6】 前記フッ化物物光ファイバのガラス組成が、ZrF<sub>4</sub>とHfF<sub>4</sub>からなる群から選ばれた少なくとも一種が3～60モル%、BaF<sub>2</sub>が6～28モル%、LaF<sub>3</sub>が1.5～6モル%、ScF<sub>3</sub>, YF<sub>3</sub>, GdF<sub>3</sub>, LuF<sub>3</sub>からなる群から選ばれた少なくとも一種が1.5～6モル%、AlF<sub>3</sub>が1.5～6モル%、PbF<sub>2</sub>が0～25モル%、LiFおよびNaFから選ばれた少なくとも一種が3～25モル%、追加成分が0～15モル%であり、かつこれら組成量の合計が1

00モル%となっていることを特徴とする請求項1または2のいずれかに記載の光ファイバ増幅器。

【請求項7】 前記テルライトファイバのガラス組成が、TeO<sub>2</sub>が55～90モル%、ZnO, WO<sub>3</sub>, Li<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>からなる群から選ばれた少なくとも二種がそれぞれ0～35モル%であり、かつこれら組成量の合計が100モル%となっていることを特徴とする請求項1または2のいずれかに記載の光ファイバ増幅器。

【請求項8】 前記カルコゲナイドファイバのガラス組成が、カチオンとしてGa, Ge, In, La, Na, Li, K, Csからなる群から選ばれた少なくとも一種を含有し、アニオンとしてS, Cl, I, Brからなる群から選ばれた少なくとも一種を含有していることを特徴とする請求項1または2のいずれかに記載の光ファイバ増幅器。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光通信システム等で使用される光ファイバ増幅器に関するものであり、特に、広帯域、低雑音特性に優れた1.3μm帯光ファイバ増幅器に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】近年、光ファイバ通信の大容量、高速化に向けた光デバイスの研究開発が、精力的に行われている。中でも、光ファイバ増幅器は、光ファイバ線路を伝送中に弱まった光信号を光のまま増幅することができるデバイスとして、従来の再生増幅中継器が必要とした光/電気あるいは電気/光の変換が不要になるばかりでなく、現在、盛んに研究開発が進められている波長多重通信(WDM)への適用においては、多数の信号波長を一括増幅することが可能であることから、従来の通信システムに較べ大幅なシステムの高度化、低コスト化を図ることが可能となる。

【0003】ここで、光ファイバ通信の重要な波長帯である1.5μm帯においては、現在、希土類イオンとしてエルビウム(Er)をコアに添加した石英系光ファイバを増幅媒体とする光ファイバ増幅器(EDFA)がすでに実用段階にある。

【0004】しかしながら、もう一つの重要な波長帯である1.3μm帯においては、希土類イオンとしてプラセオジウム(Pr)をコアに添加したフッ化物物光ファイバを増幅媒体とする光ファイバ増幅器(PDFA)が開発段階にあるが、EDFAに較べその実用化が遅れている。これは、Pr中の1.3μm発光の量子効率が低いために、光増幅用ファイバとしてフッ化物物光ファイバなどのような低いフォノンエネルギーを持つ光ファイバを用いなくてはならないこと、また、励起光源として高出力のレーザを必要とする等の理由により、EDFAに較べてモジュールの小型化、および低価格化が進んでいな

いことによるものである。

【0005】本発明者らは、この低い量子効率を改善することを旨とし、フッ化物ガラスとして従来用いられてきた $ZrF_4$ 系フッ化物ガラスに替わる新たなホストガラスとして、 $PbF_2 / InF_3$ 系フッ化物ガラス（特願平9-15744号）を新たに開発することに成功した。

【0006】この $PbF_2 / InF_3$ 系フッ化物ガラスは、従来の $ZrF_4$ 系フッ化物ガラスよりも低いフォノンエネルギーを有しており、従ってPrの1.3 $\mu m$ 発光の量子効率の改善を期待することができる。実際に、本発明者らは、該光ファイバを用いたPDFAにおいて、従来の $ZrF_4$ 系フッ化物光ファイバを増幅媒体とするPDFAの2倍の効率を達成することに成功した。

【0007】しかしながら、この1.3 $\mu m$ 帯光ファイバ増幅器PDFAが増幅できる波長帯域は、 $ZrF_4$ 系フッ化物光ファイバを用いた場合においては80nm程度、 $PbF_2 / InF_3$ 系フッ化物光ファイバを用いた場合においても90nm程度の増幅帯域（3dBダウン）に限られており、WDM通信方式の適用によるさらなる大容量化を目指すためには増幅帯域の広帯域化が望まれていた。

【0008】また、これとは別に、 $ZrF_4$ 系あるいは $PbF_2 / InF_3$ 系フッ化物光ファイバにおいてはPrの $^3H_4$ 準位から $^3F_4$ 準位への大きな基底状態吸収（GSA）が波長1.5 $\mu m$ を中心に存在するため、該GSAのすそが1.3 $\mu m$ 発光の長波長側と重なり、1.32 $\mu m$ より長波長域での雑音指数が劣化するという問題があった。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】本発明の課題は、上記欠点を解決した、低雑音で広帯域な光ファイバ増幅器を提供することにある。

【0010】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決するために、本発明の請求項1の光ファイバ増幅器は、希土類イオンが添加された複数の光増幅用ファイバが直列または並列に接続された構成を有する光ファイバ増幅器であって、前記光増幅用ファイバが、フッ化物光ファイバ、テルライトファイバ、カルコゲナイドファイバ、石英系ファイバのいずれかからなることを特徴とする。

【0011】さらに、本発明の請求項2の光ファイバ増幅器は、希土類イオンが添加された第1の光増幅用ファイバと第2の光増幅用ファイバとがアイソレータを介して直列に接続され、前記第1の光増幅用ファイバは信号光の進行方向に対して前記アイソレータの前段に位置するとともに、前記第2の光増幅用ファイバは前記アイソレータの後段に位置し、前記第1の光増幅用ファイバはカルコゲナイドファイバあるいはテルライトファイバからなり、前記第2の光増幅用光ファイバはフッ化物光フ

ファイバからなることを特徴とする。

【0012】前記各光ファイバ増幅器において、それぞれ、添加される希土類イオンとしては、Pr, Dy, Ndを用いることができる。

【0013】同様に、前記各光ファイバ増幅器において、フッ化物光ファイバのガラス組成は、原子モル分率で、 $InF_3$ が10～30モル%、 $GaF_3$ が7～30モル%、 $ZnF_2$ が10～19モル%、 $BaF_2$ が4～30モル%、 $SrF_2$ が0～24モル%、 $PbF_2$ が0～30モル%、 $LaF_3$ ,  $YF_3$ ,  $GdF_3$ ,  $LuF_3$ よりなる群から選ばれた少なくとも一種が1.5～10モル%、 $LiF$ が1.5～30モル%、 $NaF$ が0～30モル%、追加成分が0～15モル%であり、かつこれらの組成量の合計が100モル%となっても良い。

【0014】ここで、前記追加成分としては、モル%で表して、 $BeF_2$ を0～10、 $MgF_2$ を0～10、 $CaF_2$ を0～10、 $CdF_2$ を0～4、 $TlF_4$ を0～5、 $MnF_2$ を0～5、 $SmF_3$ を0～5、 $ScF_3$ を0～5、 $HfF_4$ を0～5、 $ZrF_4$ を0～5、 $KF$ を0～10、 $RbF$ を0～10、 $CsF$ を0～10、 $BiF_3$ を0～5、 $AlF_3$ を0～15からなる群の少なくとも一種を含有させることができる。

【0015】また、同様に、前記各光ファイバ増幅器において、フッ化物光ファイバのガラス組成は、原子モル分率で、 $InF_3$ が5～25モル%、 $GaF_3$ が13～40モル%、 $ZnF_2$ が4～25モル%、 $PbF_2$ が30～46モル%、 $CdF_2$ が0～20モル%、 $LaF_3$ ,  $YF_3$ ,  $GdF_3$ ,  $LuF_3$ よりなる群から選ばれた少なくとも一種が1.5～12モル%、追加成分が0～15モル%であり、かつこれらの組成量の合計が100モル%となってもよい。

【0016】ここで、前記追加成分としては、モル%で表して、 $BeF_2$ を0～10、 $MgF_2$ を0～10、 $CaF_2$ を0～10、 $BaF_2$ を0～15、 $SrF_2$ を0～15、 $TlF_4$ を0～5、 $MnF_2$ を0～5、 $SmF_3$ を0～5、 $ScF_3$ を0～5、 $HfF_4$ を0～5、 $ZrF_4$ を0～5、 $KF$ を0～10、 $RbF$ を0～10、 $CsF$ を0～10、 $BiF_3$ を0～5、 $AlF_3$ を0～15からなる群の少なくとも一種を含有させることができる。

【0017】また、同様に、前記各光ファイバ増幅器において、フッ化物光ファイバのガラス組成は、 $ZrF_4$ と $HfF_4$ からなる群から選ばれた少なくとも一種が43～60モル%、 $BaF_2$ が6～28モル%、 $LaF_3$ が1.5～6モル%、 $ScF_3$ ,  $YF_3$ ,  $GdF_3$ ,  $LuF_3$ からなる群から選ばれた少なくとも一種が1.5～6モル%、 $AlF_3$ が1.5～6モル%、 $PbF_2$ が0～25モル%、 $LiF$ および $NaF$ から得られれば少なくとも一種が3～25モル%、追加成分が0～15モル%であり、かつこれらの組成量の合計が100モル%

となっていてよい。

【0018】ここで、前記追加成分としては、モル%で表して、 $\text{BeF}_2$  を0~10、 $\text{MgF}_2$  を0~10、 $\text{CaF}_2$  を0~10、 $\text{SrF}_2$  を0~15、 $\text{CdF}_2$  を0~4、 $\text{TiF}_4$  を0~5、 $\text{MnF}_2$  を0~5、 $\text{SmF}_3$  を0~5、 $\text{ScF}_3$  を0~5、 $\text{KF}$  を0~10、 $\text{RbF}$  を0~10、 $\text{CsF}$  を0~10、 $\text{InF}_3$  を0~5、 $\text{GaF}_3$  を0~5、 $\text{BiF}_3$  を0~5からなる群の少なくとも一種を含有させることができる。

【0019】また、同様に、前記各光ファイバ増幅器において、テルライトファイバのガラス組成は、 $\text{TeO}_2$  が55~90モル%、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{WO}_3$ 、 $\text{Li}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$  からなる群から選ばれた少なくとも二種がそれぞれ0~35モル%であり、かつこれら組成量の合計が100モル%となっていてよい。

【0020】さらに、同様に、前記各光ファイバ増幅器において、カルコゲナイドファイバのガラス組成が、カチオンとしてGa、Ge、In、La、Na、Li、K、Csからなる群から選ばれた少なくとも一種を含有し、アニオンとしてS、Cl、I、Brからなる群から選ばれた少なくとも一種を含有したものであってもよい。

【0021】

【発明の実施の形態】希土類イオンの発光スペクトルは、希土類イオンが添加されたホストガラスの種類によってそれぞれ異なった形を持っている。これは、スペクトルの形を決定するエネルギーレベルの分裂（シュタルク分裂）の様子が、配位子場の影響でそれぞれのホストガラスについて異なっているためである。

【0022】発明者らは、Prの1.3 $\mu\text{m}$ 発光のスペクトル形状について鋭意検討した結果、図1に示したように、カルコゲナイドガラスおよびテルライトガラス中の1.3 $\mu\text{m}$ 発光スペクトルが、 $\text{ZrF}_4$ 系あるいは $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物ガラス中において見られるスペクトルよりも長波長側にずれていることを見出した。ここで、図1の横軸は波長を、縦軸は得られたそれぞれのガラスの1.3 $\mu\text{m}$ 発光の強度を1に規格化して示してある。

【0023】また、カルコゲナイドガラスあるいは、テルライトガラス中においては、 $^3\text{H}_4$ 準位から $^3\text{F}_4$ 準位への規定状態吸収（GSA）の中心も $\text{ZrF}_4$ 系あるいは $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物ガラス中で見られたものよりも長波長側にずれているために、 $\text{ZrF}_4$ 系あるいは $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物ガラスの光増幅時に問題となっていた1.32 $\mu\text{m}$ よりも長波長側での雑音指数の劣化も見られないことを、本発明者らは見出した。

【0024】一方、低雑音、高出力を得るための光ファイバ増幅器の構成法として、2本の光増幅用光ファイバ

の中間にアイソレータを配置したカスケード接続によるEDFAの報告例がある（山下他、“Improvement of erbium-doped fiber amplifier characteristics by insertion of midway-isolator”, In Proc. OEC'92, 17B 3-3, 1992）。このEDFAにおいては、前段の980nm励起のEDFAより得られた低雑音で高利得の信号をアイソレータを介して後段の1480nm励起のEDFAに入力することによって、低雑音、高出力の光増幅を実現している。

【0025】これは、前述したカスケード接続の光ファイバ増幅器で得られる雑音指数の値が、

【0026】

【数1】全体の雑音指数（NF）＝前段のNF＋（後段のNF）／（前段の利得）

で与えられるため、前段部において高い利得を達成すると、後段部における雑音指数の劣化が緩和されること、また、励起光から信号光へのエネルギー変換効率が励起光と信号光（1550nm）の波長が近接しているほど高いために、EDFAにおいては980nm励起よりも1480nm励起による方が高出力特性に優れていることを、利用している。

【0027】従って、前述したEDFAにおいては、前段部において980nm励起による低雑音でかつ高利得の増幅特性を実現し、後段部において1480nm励起による雑音特性の劣化を前段部での高利得によって緩和して、高出力化を行っている。

【0028】本発明者らは、低雑音で高利得、広帯域の1.3 $\mu\text{m}$ 帯用の光ファイバ増幅器の構成を鋭意検討した結果、前段に前述した波長1.34 $\mu\text{m}$ 近傍に利得のピークを持つPr添加カルコゲナイドファイバあるいはテルライトファイバを配置し、アイソレータを介した後段に波長1.30 $\mu\text{m}$ に利得のピークを持つPr添加の $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系ファイバあるいは $\text{ZrF}_4$ 系ファイバを配置することによって、低雑音でかつ高利得、広帯域な光ファイバ増幅器が構成できることを、見出した。

【0029】本構成によると、前段部と後段部に利得のピーク位置の異なる光増幅ファイバを配置することによって、正味の増幅帯域が広がるとともに、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系、あるいは $\text{ZrF}_4$ 系フッ化物光ファイバを用いたときに問題となっていた、前述したGSAの影響による波長1.32 $\mu\text{m}$ よりも長波長側での雑音指数の劣化を、前段部においてカルコゲナイド、あるいはテルライトファイバを用いて得られる1.32 $\mu\text{m}$ よりも長波長域での高利得によって、緩和することが可能となり、正味の増幅帯域全域にわたって低雑音特性が実現されるものである。

【0030】ここで、広帯域の光ファイバ増幅器を実現するためには、テルライトあるいはカルコゲナイドファイバと、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系あるいは $\text{ZrF}_4$ 系フッ

化物光ファイバとのどちらかの群が、前段あるいは後段に配置される構成となっても良い。しかしながら、広帯域でかつ、低雑音の光増幅を実現するためには、前段にテルライトあるいはカルコゲナイドファイバを、また、後段に $\text{PbF}_2$  /  $\text{InF}_3$  系、あるいは $\text{ZrF}_4$  系フッ化物光ファイバを配置することが、前述した $1.32\mu\text{m}$ より長波長での雑音指数の劣化を緩和する意味で好適である。また、テルライトあるいはカルコゲナイドファイバと、 $\text{PbF}_2$  /  $\text{InF}_3$  系あるいは $\text{ZrF}_4$  系フッ化物光ファイバとを、フィルタあるいはWDMファイバカップラを介して並列に配置する構成によっても、広帯域な光ファイバ増幅器を構成できる。

【0031】本発明による光ファイバ増幅器の構成は、前述したEDFAのカスケード接続による低雑音、高出力用光ファイバ増幅器の構成とは、前段、後段に異種のファイバを用いている点が異なる。また、用いている前段、後段の光増幅用光ファイバが有する増幅帯域が異なっており、これらの異なった増幅帯域を重ね合わせることで、光ファイバ増幅器の正味の増幅帯域を拡大している点が異なる。さらに、本発明は、 $1.3\mu\text{m}$ 帯の増幅帯域を低雑音特性を維持して拡大するためになされたものであり、前述した $1.5\mu\text{m}$ 帯での低雑音、高出力特性を実現するための構成とは、本質的に適用される波長帯が異なることを、明記しておく。

【0032】さらに、本発明者らは、本発明の光ファイバ増幅器を実現するための $\text{PbF}_2$  /  $\text{InF}_3$  系フッ化物光ファイバのガラス組成について検討を行った結果、原子モル分率で $\text{InF}_3$  を $10\sim 30$ モル%、 $\text{GaF}_3$  を $7\sim 30$ モル%、 $\text{ZnF}_2$  を $10\sim 19$ モル%、 $\text{BaF}_2$  を $4\sim 30$ モル%、 $\text{SrF}_2$  を $0\sim 24$ モル%、 $\text{PbF}_2$  を $0\sim 30$ モル%、 $\text{LaF}_3$ 、 $\text{YF}_3$ 、 $\text{GdF}_3$ 、 $\text{LuF}_3$  よりなる群から選ばれた少なくとも一種を $1.5\sim 10$ モル%、 $\text{LiF}$  を $1.5\sim 30$ モル%、 $\text{NaF}$  を $0\sim 30$ モル%、追加成分を $0\sim 15$ モル%とし、かつその合計が $100$ モル%よりなる組成域において安定なガラスが得られることを、見出した。

【0033】ここで、 $\text{InF}_3$ 、 $\text{GaF}_3$  は、ガラスの骨格をなす必須成分である。 $\text{InF}_3$  は、 $10\sim 30$ モル%含有することが望ましく、 $10$ モル%以下、あるいは $30$ モル%以上においては結晶化によって透明なガラスを得ることはできない。また、 $\text{GaF}_3$  は、 $7\sim 30$ モル%の範囲で含有することが望ましく、 $7$ モル%以下、あるいは $30$ モル%以上においては結晶化によって安定なガラスが得られない。

【0034】 $\text{ZnF}_2$ 、 $\text{BaF}_2$  は、ガラス骨格を修飾するための必須成分である。ここで、 $\text{ZnF}_2$  は $10\sim 19$ モル%の範囲で含有することが望ましく、 $10$ モル%以下、あるいは $19$ モル%以上においては結晶化の傾向が顕著となるために安定なガラスを得ることができない。 $\text{BaF}_2$  は、 $4\sim 30$ モル%含有することが望まし

く、 $4$ モル%以下、あるいは $30$ モル%以上においては結晶化によって安定なガラスを得ることができない。

【0035】 $\text{SrF}_2$  は、 $0\sim 24$ モル%の範囲で $\text{BaF}_2$  に置き換えることが可能であり、ガラスの熱安定性を増加させる働きを有する。

【0036】 $\text{PbF}_2$ 、 $\text{NaF}$  は、ガラスの熱安定性を改善するための成分である。これらの成分を含有することによって、均一なガラス融液が低温においても得られるようになり、ガラス形成能を増加させることが可能である。ここで、 $\text{PbF}_2$  は、 $0\sim 30$ モル%の範囲で含有することが望ましく、 $30$ モル%以上においてはガラス融液の揮発性が増加し、安定なガラスを得ることが難しい。 $\text{NaF}$  は、 $0\sim 30$ モル%含有することが望ましく、 $30$ モル%以上においては結晶化が顕著となって安定なガラスが得られない。

【0037】 $\text{LiF}$  は、ガラスを安定化させるのに特に重要な成分であり、 $1.5\sim 10$ モル%の範囲で含有することが特に望ましい。さらに、 $\text{PbF}_2$  を含有した系において安定なガラスを得るためには、 $\text{LiF}$  を含有することが必須の条件となる。

【0038】 $\text{LaF}_3$ 、 $\text{YF}_3$ 、 $\text{GdF}_3$ 、 $\text{LuF}_3$  は、ガラスの熱安定性を増加させるための必須の成分である。この時、これらのうち少なくとも $1$ 種を、 $1.5\sim 10$ モル%含有することが望ましく、 $1.5$ モル%以下の含有量においては熱安定性を増加を確認することはできず、また $10$ モル%以上の含有量においては結晶化の傾向が顕著となって安定なガラスが得られなくなる。

【0039】また、本発明者らは、本発明の光ファイバ増幅器を構成する $\text{PbF}_2$  /  $\text{InF}_3$  系フッ化物光ファイバの別の実施態様について検討した結果、原子モル分率で、 $\text{InF}_3$  を $5\sim 25$ モル%、 $\text{GaF}_3$  を $13\sim 40$ モル%、 $\text{ZnF}_2$  を $4\sim 25$ モル%、 $\text{PbF}_2$  を $30\sim 46$ モル%、 $\text{CdF}_2$  を $0\sim 20$ モル%、 $\text{LaF}_3$ 、あるいは $\text{YF}_3$ 、 $\text{GdF}_3$ 、 $\text{LuF}_3$  よりなる群から選ばれた少なくとも一種を $1.5\sim 12$ モル%、追加成分を $0\sim 15$ モル%とし、かつその合計が $100$ モル%よりなる組成域において安定なガラスが得られることを見出した。

【0040】ここで、 $\text{InF}_3$  および $\text{GaF}_3$  は、ガラスの骨格をなす必須成分である。この時、 $\text{InF}_3$  は $5\sim 25$ モル%含有することが望ましく、 $5$ モル%以下においては透明なガラスを得ることは不可能である。また、 $25$ モル%以上においても結晶化の傾向が顕著となり良好なガラスを得ることができない。 $\text{GaF}_3$  は、 $13\sim 40$ モル%含有することが望ましく、 $13$ モル%以下においては結晶化によって透明なガラスを得ることが難しく、 $40$ モル%以上においてはガラス融液が黄濁し透明なガラスは得られない。

【0041】 $\text{PbF}_2$ 、 $\text{ZnF}_2$  は、ガラス骨格を修飾するための必須成分である。これらのイオンが含有され

ることによって、均一な融液が低温でも得られるようになり、ガラス形成能が増加する。ここで、 $\text{PbF}_2$  は、30～46モル%含有することが望ましく、30モル以下においては結晶化によって透明なガラスを得ることが難しく、また、46モル%以上においてはガラス融液が揮発しやすくなり、安定なガラスが得られない。また、 $\text{ZnF}_2$  は、4～25モル%含有することが望ましく、4モル%以下においては結晶化によって透明なガラスは得られず、25モル%以上においても結晶化の傾向が顕著となり、透明なガラスは得られない。また、 $\text{CdF}_2$  は、0～20モルの範囲で $\text{PbF}_2$  あるいは $\text{ZnF}_2$  に置き換わって含有されることが可能である。好ましくは、0～7モルの範囲で含有されることによって、ガラス形成能を増加させ、安定なガラスを得るのに有効である。さらに、 $\text{LaF}_3$  あるいは $\text{YF}_3$ 、 $\text{GdF}_3$ 、 $\text{LuF}_3$  は、本発明のフッ化物ガラスにおいて、結晶化に対する熱安定性を改善するための必須成分である。これらのうち少なくとも一種を1.5～12モル%含有することによって、再加熱に対する熱安定性を向上させることが可能である。

【0042】さらに、本発明者らは、本発明の光ファイバ増幅器を構成する $\text{ZrF}_4$  系フッ化物光ファイバのガラス組成について検討を行った結果、 $\text{ZrF}_4$  と $\text{HfF}_4$  からなる群から選ばれた少なくとも一種を43～60モル%、 $\text{BaF}_2$  を6～28モル%、 $\text{LaF}_3$  を1.5～6モル%、 $\text{ScF}_3$ 、 $\text{YF}_3$ 、 $\text{GdF}_3$ 、 $\text{LuF}_3$  からなる群から選ばれた少なくとも一種を1.5～6モル%、 $\text{AlF}_3$  を1.5～6モル%、 $\text{PbF}_2$  を0～25モル%、 $\text{LiF}$ および $\text{NaF}$ から選ばれた少なくとも一種を3～25モル%、追加成分を0～15モル%とし、かつその合計が100モル%よりなる組成域において、安定なガラスが得られることを、見出した。

【0043】ここで、 $\text{ZrF}_4$ 、 $\text{HfF}_4$  は、ガラスの骨格である網目構造をなす必須の成分であり、43～60モル%の範囲で含有することが望ましい。43モル%より少なく、あるいは60モル%より多く含有された場合においては、ガラス内部に結晶が析出するので、不適である。また、 $\text{BaF}_2$ 、 $\text{LaF}_3$ 、 $\text{AlF}_3$  と、 $\text{LiF}$ 、 $\text{NaF}$ から選ばれた少なくとも一種と、 $\text{ScF}_3$ 、 $\text{YF}_3$ 、 $\text{GdF}_3$ 、 $\text{LuF}_3$  から選ばれた少なくとも一種は、ガラスの網目構造を修飾し、ガラスの熱安定性を高めるための必須の成分であり、それぞれ前述した範囲において含有されることが望ましい。前述した範囲を外れたものは、不適である。また、 $\text{BaF}_2$ 、 $\text{LaF}_3$ 、 $\text{AlF}_3$  と、 $\text{LiF}$ 、 $\text{NaF}$ から選ばれた少なくとも一種と、 $\text{ScF}_3$ 、 $\text{YF}_3$ 、 $\text{GdF}_3$ 、 $\text{LuF}_3$  から選ばれた少なくとも一種は、ガラスの網目構造を修飾し、ガラスの熱安定性を高めるための必須の成分であり、それぞれ前述した範囲において含有されることが望ましい。前述した範囲より多く含有された場合においては、ガラ

ス中に結晶が析出するので、不適である。また、少なくとも含有された場合においては、熱安定性を高める効果を確認することができない。

【0044】 $\text{PbF}_2$  は、 $\text{BaF}_2$  に置き換わって含有されることによってガラスの屈折率を大きくする働きを有する。前述した範囲を超えて含有された場合においては、ガラス中に結晶が析出するので、不適である。

【0045】さらに、本発明者らは、本発明の光ファイバ増幅器を構成するテルライトファイバのガラス組成について検討した結果、 $\text{TeO}_2$  を55～90モル%、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{WO}_3$ 、 $\text{Li}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{La}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$  からなる群から選ばれた少なくとも二種をそれぞれ0～35モル%含有し、かつその合計が100モル%よりなる組成域において、安定なガラスを得ることができることを、見出した。

【0046】ここで、 $\text{TeO}_2$  は、ガラスの骨格である網目構造をなす必須の成分であり、55～90モル%の範囲で含有することが望ましい。55モル%より少ない領域、あるいは90モル%よりも多い領域においては、結晶化によって安定なガラスを得ることは難しい。

【0047】また、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Li}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{WO}_3$ 、 $\text{La}_2\text{O}_3$  は、網目構造を修飾するための成分であり、これらのうち少なくとも二種類を、それぞれ0～35モル%の範囲で含有することが望ましい。35モル%よりも多く含有された場合においては、結晶化によってガラスを作製することが難しくなる。

【0048】さらに、本発明者らは、本発明の光ファイバ増幅器を構成するカルコゲナイドファイバのガラス組成について検討した結果、カチオンとして $\text{Ga}$ 、 $\text{Ge}$ 、 $\text{In}$ 、 $\text{La}$ 、 $\text{Na}$ 、 $\text{Li}$ 、 $\text{K}$ 、 $\text{Cs}$ からなる群から選ばれた少なくとも一種を含有し、アニオンとして $\text{S}$ 、 $\text{Cl}$ 、 $\text{I}$ 、 $\text{Br}$ からなる群から選ばれた少なくとも一種を含有する組成域において、安定なガラスを得ることができることを、見出した。

【0049】ここで、 $\text{Ga}_2\text{S}_3$  は、ガラスの骨格をなす必須の成分であり、38～75モル%の範囲で含有されることが望ましい。 $\text{La}_2\text{S}_3$ 、 $\text{GeS}_2$ 、 $\text{In}_2\text{S}_3$  は、ガラスの骨格を修飾して耐候性および熱安定性を高める働きを持っており、0～20モル%の範囲で含有されることが望ましい。 $\text{La}_2\text{S}_3$ 、 $\text{In}_2\text{S}_3$  が20モル%多く含有された場合には、液相温度が上昇し、 $\text{GeS}_2$  が20モル%より多く含有された場合は、ガラス融液が揮発し易くなり、安定なガラス融液の状態を得ることが難しくなる。また、 $\text{Na}_2\text{S}$ 、 $\text{Li}_2\text{S}$ 、 $\text{K}_2\text{S}$ 、 $\text{Cs}_2\text{S}$ 、 $\text{NaCl}$ 、 $\text{LiCl}$ 、 $\text{KCl}$ 、 $\text{CsCl}$ 、 $\text{NaI}$ 、 $\text{LiI}$ 、 $\text{KI}$ 、 $\text{CsI}$ 、 $\text{NaBr}$ 、 $\text{LiBr}$ 、 $\text{KBr}$ 、 $\text{CsBr}$  は、ガラスの骨格を修飾してガラス形成能を増加させる働きを有するが、55モル%より多く含有された場合においては、逆にガラス形成能を著

しく劣化させ、安定なガラスを得ることが難しくなる。

【0050】

【実施例】以下、本発明について実施例を詳細に説明するが、本発明はこれらの実施例によりなんら限定されるものでない。

【0051】（実施例1）本実施例においては、図2に示したような第1、第2の光増幅用光ファイバの中間にアイソレータを配置した光ファイバ増幅器を構成した。図中、1は第1の光増幅用ファイバ、2は第2の光増幅用ファイバ、3はアイソレータ、4はWDMファイバカップラ、5は励起光源である。

【0052】本実施例においては、第1の光増幅用ファイバとしてPr添加カルコゲナイドファイバを、また、第2の光増幅用ファイバとしてPr添加ZrF<sub>4</sub>系フッ化物光ファイバを用いて光ファイバ増幅器を構成した。

【0053】光増幅用ファイバとして用いたZrF<sub>4</sub>系フッ化物光ファイバは、ジャケット延伸法によって作製した。まず、51ZrF<sub>4</sub>-18BaF<sub>2</sub>-11PbF<sub>2</sub>-3.5LaF<sub>3</sub>-2YF<sub>3</sub>-4.5AlF<sub>3</sub>-10LiFをコアガラス組成とし、49ZrF<sub>4</sub>-21BaF<sub>2</sub>-3.5LaF<sub>3</sub>-2YF<sub>3</sub>-4.5AlF<sub>3</sub>-20NaFをクラッドガラスとするフッ化物光ファイバ母材（外形5mmφ、長さ50mm）を、サクシオンキャスティング法によって作製した。これとは別に、クラッドガラスと同一の組成を有するジャケット管（外形15mmφ、長さ140mm）をローテーションキャスティング法を用いて作製した。作製したジャケット管にファイバ母材を挿入してチャックに保持し、内部を真空排気しながら320℃に加熱された加熱炉内に上部より毎分2mmの速度で挿入し、125μmの光ファイバを製造した。製造されたZrF<sub>4</sub>系フッ化物光ファイバは単一モードであり、比屈折率差3.7%、コア径1.8μm、カットオフ波長1.0μmであり、Pr添加濃度は1000ppm、損失値は波長1.2μmで、0.04dB/mであった。

【0054】一方、カルコゲナイドファイバは、ロッドインチューブ法によって作製した。まず、65Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-14La<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-21Na<sub>2</sub>Sからなる組成のコアガラスバッチを、グラッシーカーボンるつぽ内で溶融し、ステンレス製の鋳型にキャスティングすることにより、コア母材（外径5mmφ、長さ140mm）を作製した。これとは別に50Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-15Ge<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-

14La<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-21Na<sub>2</sub>Sからなる組成のジャケット管（内径5mmφ、外径15mmφ、長さ140mm）を作製し、先に作製したコア母材の表面を光学研磨した後、ジャケット管に挿入した。ジャケット管を真空チャックに保持した後、内部を真空排気し、450℃に加熱された加熱炉内に上部から毎分2mmの速度で送り込み、ジャケット管の下部を別のチャックによって保持して下方に毎分30mmの速度で下降させることにより、外径5mmφ、コア径50μmの延伸母材を作製し、該延伸母材を再度ジャケット管に挿入し、480℃に加熱された線引き炉内に毎分3mmの送り速度でジャケット管を送り込み、外径125μmのファイバを作製した。製造された光ファイバは、Δn=1.5%、コア径2.2μm、カットオフ波長1.0μmの単一モードファイバであり、Prの添加濃度は1000ppm、損失は波長1.2μmにおいて1dB/mであった。

【0055】図3に、本実施例の光ファイバ増幅器の入射信号光量-30dBmに対する信号利得スペクトルを示す。励起光源としては発振波長1.017μmのLDを用い、前段のカルコゲナイドファイバの励起光量は100mW、後段のZrF<sub>4</sub>系ファイバの励起光量は250mWとした。図中、左縦軸は信号利得の値を示し、また横軸は信号波長を示している。用いたZrF<sub>4</sub>系の光増幅用ファイバは20mであり、また、カルコゲナイドファイバは8mである。図3には、従来のZrF<sub>4</sub>系フッ化物光ファイバの利得スペクトル（点線）、カルコゲナイドファイバの利得スペクトル（一点鎖線）も比較のために示してある。図から、波長1.29から1.35μmにわたって20dB以上利得が得られ、従来のスペクトルに対し、増幅帯域が拡大されていることが分かる。また、図3の右縦軸には雑音指数を示した。雑音指数は、測定された波長領域にわたって、5dBの低雑音を実現されており、前述したZrF<sub>4</sub>系フッ化物光ファイバを用いたときに見られた波長1.32μmより長波長域での雑音指数の劣化は、見られないことがわかる。

【0056】この他、表1から表5に示したコアガラス組成を有するカルコゲナイドファイバ、あるいは表6に示したコアガラス組成を有するZrF<sub>4</sub>系フッ化物光ファイバを用いた場合においても、同様の増幅特性を得ることができた。

【0057】

【表1】

(8)

特開平11-204859

13

14

| $\text{Ga}_2\text{S}_3$ | $\text{GeS}_2$ | $\text{In}_2\text{S}_3$ | $\text{La}_2\text{S}_3$ | $\text{CS}_2\text{S}$ | $\text{CsCl}$ | $\text{CaI}$ | $\text{CsBr}$ |
|-------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------|--------------|---------------|
| 66                      |                |                         |                         | 34                    |               |              |               |
| 55                      |                |                         |                         | 45                    |               |              |               |
| 75                      |                |                         |                         | 25                    |               |              |               |
| 45                      |                |                         |                         | 55                    |               |              |               |
| 70                      |                |                         |                         | 30                    |               |              |               |
| 70                      |                |                         |                         | 25                    | 5             |              |               |
| 66                      |                |                         |                         | 25                    | 9             |              |               |
| 55                      |                |                         |                         | 25                    | 20            |              |               |
| 65                      |                |                         |                         | 25                    |               | 10           |               |
| 65                      |                |                         |                         | 25                    |               |              | 10            |
| 57                      |                |                         | 9                       | 22                    | 12            |              |               |
| 50                      |                |                         | 16                      | 22                    | 12            |              |               |
| 63                      |                |                         | 3                       | 22                    | 12            |              |               |
| 55                      |                |                         | 11                      | 28                    | 6             |              |               |
| 50                      |                |                         | 20                      | 30                    |               |              |               |
| 70                      |                |                         | 14                      | 16                    |               |              |               |
| 65                      |                |                         | 10                      |                       | 25            |              |               |
| 65                      |                |                         | 10                      |                       |               | 25           |               |
| 65                      |                |                         | 10                      |                       |               |              | 25            |
| 64                      |                | 6                       | 14                      | 16                    |               |              |               |
| 58                      |                | 12                      | 14                      | 16                    |               |              |               |
| 52                      |                | 18                      | 14                      | 16                    |               |              |               |
| 60                      |                | 6                       | 6                       | 16                    | 12            |              |               |
| 60                      |                | 6                       | 6                       | 16                    |               | 12           |               |
| 60                      |                | 6                       | 6                       | 16                    |               |              | 12            |
| 54                      | 10             | 6                       | 14                      | 16                    |               |              |               |
| 48                      | 10             | 12                      | 14                      | 16                    |               |              |               |
| 38                      | 20             | 12                      | 14                      | 16                    |               |              |               |
| 48                      | 10             | 12                      | 14                      | 6                     |               | 10           |               |
| 48                      | 10             | 12                      | 14                      | 6                     |               |              | 10            |

【0058】

\* \* 【表2】



15

16

| $\text{Ga}_2\text{S}_3$ | $\text{GeS}_2$ | $\text{In}_2\text{S}_3$ | $\text{La}_2\text{S}_3$ | $\text{Na}_2\text{S}$ | $\text{NaCl}$ | $\text{NaI}$ | $\text{NaBr}$ |
|-------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------|--------------|---------------|
| 66                      |                |                         |                         | 34                    |               |              |               |
| 55                      |                |                         |                         | 45                    |               |              |               |
| 75                      |                |                         |                         | 25                    |               |              |               |
| 45                      |                |                         |                         | 55                    |               |              |               |
| 70                      |                |                         |                         | 30                    |               |              |               |
| 70                      |                |                         |                         | 25                    | 5             |              |               |
| 66                      |                |                         |                         | 25                    | 9             |              |               |
| 55                      |                |                         |                         | 25                    | 20            |              |               |
| 65                      |                |                         |                         | 25                    |               | 10           |               |
| 65                      |                |                         |                         | 25                    |               |              | 10            |
| 57                      |                |                         | 9                       | 22                    | 12            |              |               |
| 50                      |                |                         | 16                      | 22                    | 12            |              |               |
| 63                      |                |                         | 3                       | 22                    | 12            |              |               |
| 55                      |                |                         | 11                      | 28                    | 6             |              |               |
| 50                      |                |                         | 20                      | 30                    |               |              |               |
| 70                      |                |                         | 14                      | 16                    |               |              |               |
| 65                      |                |                         | 10                      |                       | 25            |              |               |
| 65                      |                |                         | 10                      |                       |               | 25           |               |
| 65                      |                |                         | 10                      |                       |               |              | 25            |
| 64                      |                | 6                       | 14                      | 16                    |               |              |               |
| 58                      |                | 12                      | 14                      | 16                    |               |              |               |
| 52                      |                | 18                      | 14                      | 16                    |               |              |               |
| 60                      |                | 6                       | 6                       | 16                    | 12            |              |               |
| 60                      |                | 6                       | 6                       | 16                    |               | 12           |               |
| 60                      |                | 6                       | 6                       | 16                    |               |              | 12            |
| 54                      | 10             | 6                       | 14                      | 16                    |               |              |               |
| 48                      | 10             | 12                      | 14                      | 16                    |               |              |               |
| 38                      | 20             | 12                      | 14                      | 16                    |               |              |               |
| 48                      | 10             | 12                      | 14                      | 6                     |               | 10           |               |
| 48                      | 10             | 12                      | 14                      | 6                     |               |              | 10            |

【0059】

\* \* 【表3】

| $\text{Ga}_2\text{S}_3$ | $\text{GeS}_2$ | $\text{In}_2\text{S}_3$ | $\text{La}_2\text{S}_3$ | $\text{Na}_2\text{S}$ | $\text{CsCl}$ | $\text{CsI}$ | $\text{CsBr}$ |
|-------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------|--------------|---------------|
| 70                      |                |                         |                         | 25                    | 5             |              |               |
| 66                      |                |                         |                         | 25                    | 9             |              |               |
| 55                      |                |                         |                         | 25                    | 20            |              |               |
| 65                      |                |                         |                         | 25                    |               | 10           |               |
| 65                      |                |                         |                         | 25                    |               |              | 10            |
| 57                      |                |                         | 9                       | 22                    | 12            |              |               |
| 50                      |                |                         | 16                      | 22                    | 12            |              |               |
| 63                      |                |                         | 3                       | 22                    | 12            |              |               |
| 55                      |                |                         | 11                      | 28                    | 6             |              |               |
| 65                      |                |                         | 10                      |                       | 25            |              |               |
| 65                      |                |                         | 10                      |                       |               | 25           |               |
| 65                      |                |                         | 10                      |                       |               |              | 25            |
| 60                      |                | 6                       | 6                       | 16                    | 12            |              |               |
| 60                      |                | 6                       | 6                       | 16                    |               | 12           |               |
| 60                      |                | 6                       | 6                       | 16                    |               |              | 12            |
| 48                      | 10             | 12                      | 14                      | 6                     |               | 10           |               |
| 48                      | 10             | 12                      | 14                      | 6                     |               |              | 10            |

【0060】

\* \* 【表4】

17

18

| $\text{Ga}_2\text{S}_3$ | $\text{GeS}_2$ | $\text{In}_2\text{S}_3$ | $\text{La}_2\text{S}_3$ | $\text{Na}_2\text{S}$ | KCl | KI | KBr |
|-------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----|----|-----|
| 70                      |                |                         |                         | 25                    | 5   |    |     |
| 66                      |                |                         |                         | 25                    | 9   |    |     |
| 55                      |                |                         |                         | 25                    | 20  |    |     |
| 65                      |                |                         |                         | 25                    |     | 10 |     |
| 65                      |                |                         |                         | 25                    |     |    | 10  |
| 57                      |                |                         | 9                       | 22                    | 12  |    |     |
| 50                      |                |                         | 16                      | 22                    | 12  |    |     |
| 63                      |                |                         | 3                       | 22                    | 12  |    |     |
| 55                      |                |                         | 11                      | 28                    | 6   |    |     |
| 65                      |                |                         | 10                      |                       | 25  |    |     |
| 65                      |                |                         | 10                      |                       |     | 25 |     |
| 65                      |                |                         | 10                      |                       |     |    | 25  |
| 60                      |                | 6                       | 6                       | 16                    | 12  |    |     |
| 60                      |                | 6                       | 6                       | 16                    |     | 12 |     |
| 60                      |                | 6                       | 6                       | 16                    |     |    | 12  |
| 48                      | 10             | 12                      | 14                      | 6                     |     | 10 |     |
| 48                      | 10             | 12                      | 14                      | 6                     |     |    | 10  |

【0061】

\* \* 【表5】

| $\text{Ga}_2\text{S}_3$ | $\text{GeS}_2$ | $\text{In}_2\text{S}_3$ | $\text{La}_2\text{S}_3$ | $\text{Na}_2\text{S}$ | LiCl | LiI | LiBr |
|-------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|------|-----|------|
| 70                      |                |                         |                         | 25                    | 5    |     |      |
| 66                      |                |                         |                         | 25                    | 9    |     |      |
| 55                      |                |                         |                         | 25                    | 20   |     |      |
| 65                      |                |                         |                         | 25                    |      | 10  |      |
| 65                      |                |                         |                         | 25                    |      |     | 10   |
| 57                      |                |                         | 9                       | 22                    | 12   |     |      |
| 50                      |                |                         | 16                      | 22                    | 12   |     |      |
| 63                      |                |                         | 3                       | 22                    | 12   |     |      |
| 55                      |                |                         | 11                      | 28                    | 6    |     |      |
| 65                      |                |                         | 10                      |                       | 25   |     |      |
| 65                      |                |                         | 10                      |                       |      | 25  |      |
| 65                      |                |                         | 10                      |                       |      |     | 25   |
| 60                      |                | 6                       | 6                       | 16                    | 12   |     |      |
| 60                      |                | 6                       | 6                       | 16                    |      | 12  |      |
| 60                      |                | 6                       | 6                       | 16                    |      |     | 12   |
| 48                      | 10             | 12                      | 14                      | 6                     |      | 10  |      |
| 48                      | 10             | 12                      | 14                      | 6                     |      |     | 10   |

【0062】

\* \* 【表6】

19

20

| ZrF <sub>4</sub> | HfF <sub>4</sub> | BaF <sub>2</sub> | PbF <sub>2</sub> | BeF <sub>2</sub> | LaF <sub>3</sub> | ScF <sub>3</sub> | YF <sub>3</sub> | GdF <sub>3</sub> | LuF <sub>3</sub> | AlF <sub>3</sub> | LiF | NaF  |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----|------|
| 52               |                  | 27               |                  |                  |                  |                  |                 |                  |                  |                  |     | 21   |
| 52               |                  | 20               |                  |                  | 4.5              |                  |                 |                  |                  |                  |     | 23.5 |
| 52               |                  | 13               | 11               |                  | 2.5              |                  |                 |                  |                  |                  |     | 21.5 |
| 47.5             |                  | 23.5             |                  |                  | 2.5              |                  | 2               |                  |                  | 4.5              | 10  | 10   |
| 47.5             |                  | 23.5             |                  |                  | 2.5              |                  | 2               |                  |                  | 4.5              |     | 20   |
|                  | 47.5             | 23.5             |                  |                  | 2.5              |                  | 2               |                  |                  | 4.5              |     | 20   |
|                  | 43               | 28               |                  |                  | 2.5              |                  | 4               |                  |                  | 2.5              |     | 20   |
| 43               |                  | 28               |                  |                  | 2.5              | 4                |                 |                  |                  | 2.5              |     | 20   |
| 43               |                  | 28               |                  |                  | 2.5              |                  |                 |                  | 4                | 2.5              |     | 20   |
| 55               |                  | 18.5             |                  |                  | 4                |                  | 2               |                  |                  | 2.5              |     | 18   |
|                  | 52.5             | 18               |                  |                  | 3                |                  | 2               |                  |                  | 4.5              |     | 20   |
|                  | 55               | 18               |                  |                  | 2.5              |                  | 2               |                  |                  | 4.5              |     | 18   |
|                  | 52.5             | 23.5             |                  |                  | 2.5              |                  | 2               |                  |                  | 4.5              |     | 15   |
| 43               |                  | 26               |                  |                  | 3.5              |                  | 2               |                  |                  | 2.5              |     | 23   |
| 48               |                  | 25               |                  |                  | 1.5              |                  | 1.5             |                  |                  | 5                | 19  |      |
| 48               |                  | 25               |                  |                  | 1.5              | 1.5              |                 |                  |                  | 5                | 19  |      |
| 48               |                  | 25               |                  |                  | 1.5              |                  |                 | 1.5              |                  | 5                | 19  |      |
| 48               |                  | 25               |                  |                  | 1.5              |                  |                 |                  | 1.5              | 5                | 19  |      |
|                  | 48.5             | 23.5             |                  |                  | 4                |                  | 0               |                  |                  | 5                | 19  |      |
|                  | 46.5             | 23.5             |                  |                  | 6                |                  | 2.5             |                  |                  | 1.5              |     | 20   |
|                  | 46.5             | 22.5             |                  |                  | 1.5              |                  | 4               |                  |                  | 4.5              |     | 21   |
| 50               |                  | 20               | 10               |                  | 3.5              |                  | 2               |                  |                  | 4.5              | 10  |      |
| 50               |                  | 20               | 10               |                  | 6                |                  |                 |                  |                  | 4                | 10  |      |
| 50               |                  | 18               | 15               |                  | 2                |                  | 2               |                  |                  | 2                | 10  |      |
| 50               |                  | 18               | 15               |                  | 2                |                  | 2               |                  |                  | 2                |     | 10   |
| 50               |                  | 19               | 15               |                  | 2                |                  | 2               |                  |                  | 2                | 5   | 5    |
| 60               |                  | 6                | 22               |                  | 6                |                  | 1.5             |                  |                  | 1.5              | 3   |      |
| 60               |                  | 6                | 22               |                  | 6                | 1.5              |                 |                  |                  | 1.5              | 3   |      |
| 60               |                  | 13               | 15               |                  | 3                |                  |                 | 1.5              | 3                | 1.5              | 3   |      |
| 60               |                  | 17               | 7                |                  | 4                |                  | 3               |                  |                  | 5                | 4   |      |
| 60               |                  | 17               | 7                |                  | 4                |                  | 3               |                  |                  | 5                |     | 4    |
| 60               |                  | 17               | 7                |                  | 4                |                  | 3               |                  |                  | 5                | 4   |      |
| 56               |                  | 17               | 7                |                  | 3                |                  |                 |                  |                  | 5                |     | 12   |

【0063】（比較例1）実施例1と同様の構成の光ファイバ増幅器を構成した。ただし、本比較例においては、第1、第2の光増幅用ファイバは、共にZrF<sub>4</sub>系フッ化物光ファイバを用いた。図4に、本比較例の光ファイバ増幅器によって得られた利得スペクトルを示す。入射信号光量は-30dBmとし、励起波長は1.017μm、励起光量は前段および後段ともに300mWとした。図中、左縦軸は信号利得を表し、また横軸は信号波長を表す。3dBダウンの増幅帯域は、1.29～1.31μmまでの20nmであり、実施例1の構成よりも狭いことが分かる。また、図中、右縦軸に示した雑音指数も1.33μmよりも長波長域において上昇していることが分かる。以上より、実施例1の構成の光ファイバ増幅器が、広帯域特性、雑音特性に優れていることが分かる。

【0064】（比較例2）本比較例においては、実施例1の光ファイバ増幅器の構成において、第1の光増幅用ファイバとして、ZrF<sub>4</sub>系フッ化物光ファイバを、また、第2の光増幅用ファイバとしてカルコゲナイドファイバを配置した構成を有する光ファイバ増幅器を構成した。図5に、本比較例の構成により得られた利得スペクトルを示す。入射信号光量は-30dBmであり、励起波長は1.017μmとした。図は、左縦軸に利得を横軸に波長を示している。図から波長1.295～1.355μmにわたって20dBの利得が得られており、増幅帯域が従来のスペクトルに較べ拡大されていることが\*50

\*わかる。また、図5の右縦軸には雑音指数を示した。雑音指数は波長1.32μmよりも長波長側で劣化しており、本構成による雑音指数の改善が認められないことがわかる。

【0065】（実施例2）本実施例においては、実施例1と同様の構成において、第1の光増幅用ファイバとしてPr添加テルライトファイバを、また、第2の光増幅用ファイバとしてPr添加PbF<sub>2</sub>/InF<sub>3</sub>系フッ化物光ファイバを用いた光ファイバ増幅器を作製した。

【0066】第1の光増幅用ファイバとして用いたテルライトファイバはジャケット延伸法によって作製した。まず、70TeO<sub>2</sub>-10ZnO<sub>2</sub>-5Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-10Na<sub>2</sub>Oをコアガラス組成とし、70TeO<sub>2</sub>-10ZnO<sub>2</sub>-15Na<sub>2</sub>Oをクラッドガラスとするフッ化物光ファイバ母材（外径5mmφ、長さ50mm）をサクションキャスティング法によって作製した。これとは別に、クラッドガラスと同一の組成を有するジャケット管（外径15mmφ、長さ140mm）をローテーションキャスティング法を用いて作製した。作製したジャケット管にファイバ母材を挿入してチャックに保持し、内部を真空排気しながら350℃に加熱された加熱炉内に上部より毎分2mmの速度で挿入し、別のチャックで保持されたジャケット管下部を毎分30mmの速度で下部に延伸することによって、コア径が細径化された第2のファイバ母材を得た。得られた第2のファイバ母材を別に用意したジャケット管（70TeO<sub>2</sub>-10ZnO

21

$2-15\text{Na}_2\text{O}$ 、外径15mmφ、長さ140mm)に挿入し、ジャケット管上部をチャックで保持して内部を真空排気しながら、380℃に加熱された線引き炉中に毎分3mmの速度で挿入し、線引きすることによって外径125μmの光ファイバを製造した。製造されたテルライトファイバは単一モードであり、比屈折率差1.5%、コア径2.2μm、カットオフ波長1.0μmであり、Pr添加濃度は1000ppm、損失値は波長1.2μmで、0.06dB/mであった。

【0067】一方、第2の光増幅用光ファイバとして用いた $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物光ファイバも同様のジャケット延伸法によって作製した。25.5InF<sub>3</sub>-11.5GaF<sub>3</sub>-15ZnF<sub>2</sub>-18PbF<sub>2</sub>-12BaF<sub>2</sub>-8SrF<sub>2</sub>-2.5YF<sub>3</sub>-2.5LaF<sub>3</sub>-5LiFをコアガラス組成とし、25.5InF<sub>3</sub>-11.5GaF<sub>3</sub>-14ZnF<sub>2</sub>-2.5PbF<sub>2</sub>-19BaF<sub>2</sub>-8SrF<sub>2</sub>-2.5YF<sub>3</sub>-2.5LaF<sub>3</sub>-7.5NaF-7LiFをクラッドガラスとするフッ化物光ファイバ母材(外径5mmφ、長さ50mm)をサクシオンキャスト法によって作製した。これとは別に、ジャケット管(49ZrF<sub>4</sub>-21BaF<sub>2</sub>-3.5LaF<sub>3</sub>-2YF<sub>3</sub>-4.5AlF<sub>3</sub>-2ONaF、外径15mmφ、長さ140mm)をローテーションキャスト法を用いて作製した。作製したジャケット管にファイバ母材を挿入してチャックに保持し、内部を真空排気しながら320℃に加熱された加熱炉内に上部より毎分2mmの速度で挿入し、別のチャックで保持されたジャケット管下部を毎分30mmの速度で下部に延伸することによって、コア径が細径化された第2のファイバ母材を得た。得られた第2のファイバ母材を別に用意したジャケット管(外径12mmφ、長さ140mm)に挿入し、ジャケット管上部をチャックで保持して内部を真空排気しながら、350℃に加熱された線引き炉中に毎分3mmの速度で挿入し、線引きすることによって外径125μmの光ファイバを製造した。製造された $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物光ファイバは単一モードであり、比屈折率差3.7%、コア径1.8μm、カットオフ波長1.0μmであり、Pr添

22

加濃度は1000ppm、損失値は波長1.2μmで、0.04dB/mであった。

【0068】図6に、本実施例の光ファイバ増幅器の入射信号光量-30dBmに対する信号利得スペクトルを示す。励起光源としては発振波長1.017μmのLDを用い、前段のテルライトファイバの励起光量は300mW、後段の $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物光ファイバの励起光量は200mWとした。図中、左縦軸は信号利得の値を示し、また、横軸は信号波長を示している。用いた $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系の光増幅用ファイバは15mであり、また、テルライトファイバは5mである。図6には、従来の $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物光ファイバの利得スペクトル(点線)、テルライトファイバの利得スペクトル(一点鎖線)も比較のために示してある。図から、波長1.285から1.345μmにわたって20dB以上利得が得られ、従来のスペクトルに対し、増幅帯域が拡大されていることが分かる。また、図6の右縦軸には雑音指数を示した。雑音指数は測定された波長領域にわたって、5dBの低雑音を実現されており、前述した $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物光ファイバを用いたときに見られた波長1.32μmより長波長域での雑音指数の劣化を見られないことがわかる。この他、表7から表9に示したコアガラス組成を有するテルライトファイバ、あるいは、表10、表11に示したコアガラス組成を有する $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物光ファイバを用いた場合においても、同様の増幅特性を得ることができた。

【0069】この他、第2の光増幅用ファイバとして実施例1で用いたZrF<sub>4</sub>系フッ化物光ファイバを用いた場合(テルライトファイバ+ZrF<sub>4</sub>系ファイバ)、あるいは、第1の光増幅用ファイバとして実施例1で用いたカルコゲナイドファイバを用いた場合(カルコゲナイドファイバ+ $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系ファイバ)においても、同様に低雑音かつ増幅帯域が拡大した光ファイバ増幅器を構成することができた。

【0070】

【表7】

23

24

| No | TeO <sub>2</sub> | Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ZnO | Na <sub>2</sub> O | Li <sub>2</sub> O | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | WO <sub>3</sub> | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|----|------------------|--------------------------------|-----|-------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 1  | 55               | 5                              | 5   | 35                |                   |                                |                 |                                |
| 2  | 55               | 5                              | 15  | 25                |                   |                                |                 |                                |
| 3  | 55               | 5                              | 30  | 10                |                   |                                |                 |                                |
| 4  | 70               | 5                              |     | 25                |                   |                                |                 |                                |
| 5  | 70               | 5                              | 5   | 20                |                   |                                |                 |                                |
| 6  | 70               | 5                              | 20  | 5                 |                   |                                |                 |                                |
| 7  | 80               | 5                              |     | 15                |                   |                                |                 |                                |
| 8  | 80               | 5                              | 5   | 10                |                   |                                |                 |                                |
| 9  | 80               | 5                              | 15  |                   |                   |                                |                 |                                |
| 10 | 90               | 5                              | 2.5 | 2.5               |                   |                                |                 |                                |
| 11 | 60               |                                | 10  | 30                |                   |                                |                 |                                |
| 12 | 70               |                                |     | 30                |                   |                                |                 |                                |
| 13 | 70               |                                | 15  | 15                |                   |                                |                 |                                |
| 14 | 70               |                                | 30  |                   |                   |                                |                 |                                |
| 15 | 80               |                                |     | 20                |                   |                                |                 |                                |
| 16 | 80               |                                | 10  | 10                |                   |                                |                 |                                |
| 17 | 55               | 5                              | 5   |                   | 35                |                                |                 |                                |
| 18 | 55               | 5                              | 35  |                   | 5                 |                                |                 |                                |
| 19 | 70               | 5                              |     |                   | 25                |                                |                 |                                |
| 20 | 70               | 5                              | 5   |                   | 20                |                                |                 |                                |
| 21 | 70               | 5                              | 15  |                   | 10                |                                |                 |                                |
| 22 | 70               | 5                              | 25  |                   |                   |                                |                 |                                |
| 23 | 60               |                                | 10  |                   | 30                |                                |                 |                                |
| 24 | 60               |                                | 20  |                   | 20                |                                |                 |                                |
| 25 | 70               |                                |     |                   | 30                |                                |                 |                                |
| 26 | 70               |                                | 15  |                   | 15                |                                |                 |                                |
| 27 | 80               |                                |     |                   | 20                |                                |                 |                                |
| 28 | 80               |                                | 10  |                   | 10                |                                |                 |                                |
| 29 | 55               |                                |     | 35                |                   |                                | 10              |                                |
| 30 | 60               |                                |     | 30                |                   |                                | 10              |                                |

【0071】

\* \* 【表8】

| No | TeO <sub>2</sub> | Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ZnO | Na <sub>2</sub> O | Li <sub>2</sub> O | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | WO <sub>3</sub> | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|----|------------------|--------------------------------|-----|-------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 31 | 60               |                                |     | 20                |                   |                                | 20              |                                |
| 32 | 70               |                                |     | 30                |                   |                                |                 |                                |
| 33 | 70               |                                |     | 15                |                   |                                | 15              |                                |
| 34 | 70               |                                |     |                   |                   |                                | 30              |                                |
| 35 | 70               | 5                              |     | 25                |                   |                                |                 |                                |
| 36 | 70               | 5                              |     | 15                |                   |                                | 10              |                                |
| 37 | 70               | 5                              |     | 5                 |                   |                                | 20              |                                |
| 38 | 70               | 5                              |     |                   |                   |                                | 25              |                                |
| 39 | 80               |                                |     | 20                |                   |                                |                 |                                |
| 40 | 80               |                                |     | 10                |                   |                                | 10              |                                |
| 41 | 90               |                                |     | 5                 |                   |                                | 5               |                                |
| 42 | 55               |                                |     |                   | 35                |                                | 10              |                                |
| 43 | 60               |                                |     |                   | 30                |                                | 10              |                                |
| 44 | 60               |                                |     |                   | 20                |                                | 20              |                                |
| 45 | 70               | 5                              |     |                   | 15                |                                | 10              |                                |
| 46 | 70               | 5                              |     |                   | 5                 |                                | 20              |                                |
| 47 | 80               |                                |     |                   | 20                |                                |                 |                                |
| 48 | 80               |                                |     |                   | 10                |                                | 10              |                                |
| 49 | 90               |                                |     |                   | 5                 |                                | 5               |                                |
| 50 | 55               |                                |     | 35                |                   | 10                             |                 |                                |
| 51 | 70               |                                |     | 30                |                   |                                |                 |                                |
| 52 | 70               |                                |     | 15                |                   | 15                             |                 |                                |
| 53 | 70               |                                |     |                   |                   | 30                             |                 |                                |
| 54 | 70               | 5                              |     | 25                |                   |                                |                 |                                |
| 55 | 70               | 5                              |     | 15                |                   | 10                             |                 |                                |
| 56 | 80               |                                |     | 20                |                   |                                |                 |                                |

【0072】

\* \* 【表9】

| 25 |                                | 26                             |     |                   |                   |                                |                 |                                |
|----|--------------------------------|--------------------------------|-----|-------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| No | Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ZnO | Na <sub>2</sub> O | Li <sub>2</sub> O | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | WO <sub>3</sub> | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| 57 | 80                             |                                |     | 10                |                   | 10                             |                 |                                |
| 58 | 90                             |                                |     | 5                 |                   | 5                              |                 |                                |
| 59 | 70                             |                                |     |                   | 15                | 15                             |                 |                                |
| 60 | 70                             | 5                              |     |                   | 25                |                                |                 |                                |
| 61 | 70                             | 5                              |     |                   | 15                | 10                             |                 |                                |
| 62 | 70                             | 5                              |     |                   | 5                 | 20                             |                 |                                |
| 63 | 80                             |                                |     |                   | 20                |                                |                 |                                |
| 64 | 80                             |                                |     |                   | 10                | 10                             |                 |                                |
| 65 | 90                             |                                |     |                   | 5                 | 5                              |                 |                                |
| 66 | 55                             |                                |     | 35                |                   |                                |                 | 10                             |
| 67 | 60                             |                                |     | 30                |                   |                                |                 | 10                             |
| 68 | 70                             |                                |     | 15                |                   |                                |                 | 15                             |
| 69 | 70                             |                                |     |                   |                   |                                |                 | 30                             |
| 70 | 70                             | 5                              |     | 25                |                   |                                |                 |                                |
| 71 | 70                             | 5                              |     | 15                |                   |                                |                 | 10                             |
| 72 | 80                             |                                |     | 20                |                   |                                |                 |                                |
| 73 | 80                             |                                |     | 10                |                   |                                |                 | 10                             |
| 74 | 90                             |                                |     | 5                 |                   |                                |                 | 5                              |
| 75 | 55                             |                                |     |                   | 35                |                                |                 | 10                             |
| 76 | 70                             |                                |     |                   | 15                |                                |                 | 15                             |
| 77 | 70                             | 5                              |     |                   | 25                |                                |                 |                                |
| 78 | 70                             | 5                              |     |                   | 15                |                                |                 | 10                             |
| 79 | 70                             | 5                              |     |                   | 5                 |                                |                 | 20                             |
| 80 | 80                             |                                |     |                   | 20                |                                |                 |                                |
| 81 | 80                             |                                |     |                   | 10                |                                |                 | 10                             |
| 82 | 90                             |                                |     |                   | 5                 |                                |                 | 5                              |

【0073】

\* \* 【表10】

| InF <sub>3</sub> | GaF <sub>3</sub> | ZnF <sub>2</sub> | PbF <sub>2</sub> | BaF <sub>2</sub> | SrF <sub>2</sub> | CdF <sub>2</sub> | MgF <sub>2</sub> | AlF <sub>3</sub> | YF <sub>3</sub> | LaF <sub>3</sub> | GdF <sub>3</sub> | LuF <sub>3</sub> | LiF | NaF |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----|-----|
| 13.0             | 40.0             | 12.0             | 20.0             | 5.0              |                  |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |     |
| 13.0             | 35.0             | 12.0             | 25.0             | 5.0              |                  |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |     |
| 12.0             | 31.0             | 12.0             | 25.0             | 5.0              | 5.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |     |
| 13.0             | 29.0             | 12.0             | 33.0             | 5.0              |                  |                  |                  |                  | 4.0             | 4.0              |                  |                  |     |     |
| 13.0             | 29.0             | 5.0              | 38.0             | 4.0              |                  |                  |                  |                  | 11.0            |                  |                  |                  |     |     |
| 13.0             | 29.0             | 5.0              | 34.0             | 4.0              |                  |                  |                  |                  | 15.0            |                  |                  |                  |     |     |
| 13.0             | 29.0             | 5.0              | 34.0             | 4.0              |                  |                  |                  |                  |                 | 15.0             |                  |                  |     |     |
| 13.0             | 29.0             | 8.0              | 38.0             | 4.0              |                  |                  |                  |                  | 4.0             | 4.0              |                  |                  |     |     |
| 13.0             | 24.0             | 8.0              | 43.0             | 4.0              |                  |                  |                  |                  | 4.0             | 4.0              |                  |                  |     |     |
| 12.0             | 24.0             | 8.0              | 48.0             |                  | 4.0              |                  |                  |                  | 4.0             |                  |                  |                  |     |     |
| 10.0             | 24.0             | 8.0              | 50.0             |                  | 4.0              |                  |                  |                  | 4.0             |                  |                  |                  |     |     |
| 10.0             | 27.0             | 15.0             | 25.0             | 9.0              | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |     |
| 12.0             | 25.0             | 15.0             | 25.0             | 9.0              | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |     |
| 15.0             | 22.0             | 15.0             | 25.0             | 9.0              | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |     |
| 18.5             | 18.5             | 15.0             | 25.0             | 9.0              | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |     |
| 18.5             | 18.5             | 15.0             | 25.0             | 9.0              | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |     |
| 18.5             | 18.5             | 15.0             | 25.0             | 9.0              | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             |                  | 2.5              |                  | 5.0 |     |
| 18.5             | 18.5             | 15.0             | 25.0             | 9.0              | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             |                  |                  | 2.5              | 5.0 |     |
| 18.5             | 18.5             | 15.0             | 20.0             | 14.0             | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |     |
| 18.5             | 18.5             | 13.0             | 20.0             | 16.0             | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |     |
| 18.5             | 18.5             | 15.0             | 15.0             | 19.0             | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |     |
| 18.5             | 18.5             | 15.0             | 10.0             | 20.0             | 8.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |     |
| 18.5             | 18.5             | 15.0             | 10.0             | 20.0             | 8.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 | 5.0 |
| 20.0             | 17.0             | 15.0             | 25.0             | 9.0              | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |     |
| 21.5             | 15.5             | 15.0             | 25.0             | 9.0              | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |     |
| 23.0             | 14.0             | 15.0             | 25.0             | 9.0              | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |     |

【0074】

\* \* 【表11】

27

28

| InF <sub>3</sub> | GaF <sub>3</sub> | ZrF <sub>4</sub> | PbF <sub>2</sub> | BaF <sub>2</sub> | SrF <sub>2</sub> | CdF <sub>2</sub> | MgF <sub>2</sub> | AlF <sub>3</sub> | YF <sub>3</sub> | LaF <sub>3</sub> | GdF <sub>3</sub> | LuF <sub>3</sub> | LiF | NaF  |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----|------|
| 25.5             | 11.5             | 15.0             | 12.0             | 18.0             | 8.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |      |
| 25.5             | 11.5             | 15.0             | 14.0             | 18.0             | 8.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |      |
| 25.5             | 11.5             | 12.0             | 8.0              | 25.0             | 8.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  |     | 5.0  |
| 25.5             | 11.5             | 12.0             |                  | 35.0             | 6.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  |     | 5.0  |
| 25.5             | 11.5             | 12.0             |                  | 29.0             | 12.0             |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  |     | 5.0  |
| 25.5             | 11.5             | 12.0             |                  | 16.0             | 25.0             |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  |     | 5.0  |
| 25.5             | 11.5             | 12.0             |                  | 6.0              | 35.0             |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  |     | 5.0  |
| 25.5             | 11.5             | 15.0             |                  | 18.0             | 8.0              |                  |                  |                  | 2.5             |                  | 2.5              |                  |     | 17.0 |
| 25.5             | 11.5             | 15.0             |                  | 18.0             | 8.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 | 12.0 |
| 25.5             | 11.5             | 15.0             | 2.5              | 18.0             | 8.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 | 9.5  |
| 25.5             | 11.5             | 15.0             | 5.0              | 18.0             | 8.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 | 7.0  |
| 25.5             | 11.5             | 12.0             |                  | 18.0             | 8.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 | 15.0 |
| 25.5             | 11.5             | 12.0             |                  | 18.0             | 3.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 | 20.0 |
| 25.5             | 11.5             | 10.0             |                  | 18.0             |                  |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  |     | 30.0 |
| 25.5             | 11.5             | 15.0             |                  | 18.0             | 8.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 | 12.0 |
| 26.0             | 11.0             | 15.0             | 25.0             | 9.0              | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |      |
| 29.0             | 8.0              | 15.0             | 25.0             | 9.0              | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |      |
| 29.0             | 8.0              | 15.0             | 20.0             | 14.0             | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             |                  | 2.5              |                  | 5.0 |      |
| 29.0             | 8.0              | 15.0             | 15.0             | 19.0             | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             |                  |                  | 2.5              | 5.0 |      |
| 29.0             | 8.0              | 15.0             | 10.0             | 24.0             | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |      |
| 29.0             | 8.0              | 15.0             | 5.0              | 29.0             | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |      |
| 29.0             | 8.0              | 15.0             |                  | 14.0             | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 | 20   |
| 29.0             | 8.0              | 15.0             |                  | 18.0             | 8.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 | 12   |
| 32.0             | 5.0              | 15.0             | 25.0             | 9.0              | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |      |
| 35.5             | 1.5              | 15.0             | 25.0             | 9.0              | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 |      |
| 35.5             | 1.5              | 15.0             |                  | 9.0              | 4.0              |                  |                  |                  | 2.5             | 2.5              |                  |                  | 5.0 | 25.0 |

【0075】（比較例3）本比較例においては、実施例2の光ファイバ増幅器の構成において、第1の光増幅用ファイバとしてPbF<sub>2</sub>/InF<sub>3</sub>系フッ化物光ファイバを、また、第2の光増幅用ファイバとしてテルライトファイバを配置した構成を有する光ファイバ増幅器を構成した。本比較例の構成による利得スペクトルを測定したところ、波長1.285～1.345μmにわたって20dBの利得が得られており、従来のスペクトルに比べ増幅帯域が拡大されていることが確認されたが、雑音指数は波長1.32μmよりも長波長側で劣化しており、本比較例による雑音指数の改善は認められなかった。

【0076】（実施例3）本実施例においては、図7に示したような第1、第2、第3の光増幅用ファイバを直列に接続した構成を有する光ファイバ増幅器を作製した。図中、11は第1の光増幅用ファイバ、12は第2の光増幅用ファイバ、13は第3の光増幅用ファイバ、3はアイソレータ、4はファイバ型WDMカブラ、4'はバルク型WDMカブラ、5は励起光源である。

【0077】本実施例においては、第1の光増幅用ファイバとしてテルライトファイバを用い、第2の光増幅用ファイバとしてカルコゲナイドファイバを用い、第3の光増幅用ファイバとしてZrF<sub>4</sub>系フッ化物光ファイバを用い、各ファイバの諸元としては、実施例1および2で用いたファイバの諸元と同様のものを用いた。該光ファイバ増幅器の利得スペクトルを測定したところ、波長1.28～1.345μmにわたって、20dB以上の利得と5dBの低い雑音指数を確認することができた。この他、第1、第2の光増幅用ファイバを入れ替えた場合においても同様の増幅帯域と雑音指数を確認すること\*50

\*ができた。また、第3の光増幅用ファイバとしてPbF<sub>2</sub>/InF<sub>3</sub>系フッ化物光ファイバを用いた場合、（テルライトファイバ+カルコゲナイドファイバ+PbF<sub>2</sub>/InF<sub>3</sub>系ファイバ）あるいは（カルコゲナイドファイバ+テルライトファイバ+PbF<sub>2</sub>/InF<sub>3</sub>系ファイバ）の構成において、同様の増幅帯域と雑音指数を確認することができた。

【0078】（実施例4）本実施例においては、図8に示したような第1、第2の光増幅用光ファイバを並列に接続した構成を有する光ファイバ増幅器を開発した。ここで、11は第1の光増幅用ファイバ、12は第2の光増幅用ファイバ、3はアイソレータ、4はファイバ型WDMカブラ、4'はバルク型WDMカブラ、5は励起光源、6は減衰器である。

【0079】本実施例においては、第1の光増幅用光ファイバとしてPr添加カルコゲナイドファイバを、第2の光増幅用ファイバとしてPr添加PbF<sub>2</sub>/InF<sub>3</sub>系ファイバを用いた。本実施例においては、図に示したバルク型WDMカブラ4'に用いるフィルタを誘電多層膜フィルタとし、波長1.28～1.32μmまでの信号光は第2の光増幅用ファイバを通り、波長1.32～1.36μmの信号光は第1の光増幅用ファイバを通る構成とした。また、第1、第2の光増幅用ファイバの利得の値を等しくするために、減衰器7をそれぞれ光増幅用ファイバの後段に配置した。

【0080】図9に、入射信号光量-30dBmの場合に得られた利得スペクトルを示す。図は、左縦軸に利得を、横軸に波長を示している。図から、用いたフィルタの損失が増加する1.32μm付近に利得の減少が見られるが、1.29～1.35μmにわたる波長範囲にお

いて平坦な利得特性が得られていることがわかる。また、図9右縦軸に雑音指数を示した。雑音指数はフィルタの損失が増加する $1.32\mu\text{m}$ 付近において増加しているが、その他の波長範囲においては5dBの雑音指数が得られていることがわかる。

【0081】(実施例5) 本実施例においては、実施例1で用いた光ファイバ増幅器の構成において、第1の光増幅用ファイバとしてPr添加カルコゲナイドファイバを用い、第2の光増幅用光ファイバとしてDy添加カルコゲナイドファイバを用いて、光ファイバ増幅器を作製した。入射信号光量 $-30\text{dBm}$ に対する利得スペクトルを測定したところ、波長 $1.25\sim 1.4\mu\text{m}$ にわたって利得を確認することができた。また、第2の光増幅用ファイバとして、Dy添加テルライトファイバ、ZrF<sub>4</sub>系ファイバ、PbF<sub>2</sub>/InF<sub>3</sub>系ファイバを用いた場合においても、同様の広い増幅帯域を確認することができた。

【0082】(実施例6) 本実施例においては、実施例1で用いた光ファイバ増幅器の構成において、第1の光増幅用ファイバとしてNd添加カルコゲナイドファイバを用い、また、第2の光増幅用光ファイバとしてDy添加カルコゲナイドファイバを用いて、光ファイバ増幅器を作製した。入射信号光量 $-30\text{dBm}$ に対する利得スペクトルを測定したところ、波長 $1.2\sim 1.4\mu\text{m}$ にわたって利得を確認することができた。また、第2の光増幅用ファイバとして、Dy添加テルライトファイバ、ZrF<sub>4</sub>系ファイバ、PbF<sub>2</sub>/InF<sub>4</sub>系ファイバを、あるいはPr添加ZrF<sub>4</sub>系ファイバ、PbF<sub>2</sub>/InF<sub>3</sub>系ファイバを用いた場合、さらに第1の光増幅用ファイバとして、Nd添加テルライトファイバ、石英系ファイバ、石英系結晶化ファイバを用いた場合においても、同様の広い増幅帯域を確認することができた。

【0083】

【発明の効果】以上の実施例に示したように、本発明によれば低雑音で広帯域な光ファイバ増幅器が構成できるので、 $1.3\mu\text{m}$ 帯光通信システムの高度化および低コスト化が図れるという利点がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の光ファイバ増幅器を構成するPr添加カルコゲナイドファイバ、テルライトファイバ、PbF<sub>2</sub>/InF<sub>3</sub>系ファイバ、ZrF<sub>4</sub>系ファイバの蛍光スペクトルを示す図である。

【図2】 本発明の実施例1の光ファイバ増幅器の構成を示す図である。

【図3】 本発明の実施例1の光ファイバ増幅器の利得スペクトルを示す図である。

【図4】 本発明の比較例1の光ファイバ増幅器の利得スペクトルを示す図である。

【図5】 本発明の比較例2の光ファイバ増幅器の利得スペクトルを示す図である。

【図6】 本発明の実施例2の光ファイバ増幅器の利得スペクトルを示す図である。

【図7】 本発明の実施例3の光ファイバ増幅器の構成を示す図である。

【図8】 本発明の実施例4の光ファイバ増幅器の構成を示す図である。

【図9】 本発明の実施例4の光ファイバ増幅器の利得スペクトルを示す図である。

【符号の説明】

11, 12, 13 第1, 第2, 第3の光増幅用ファイバ

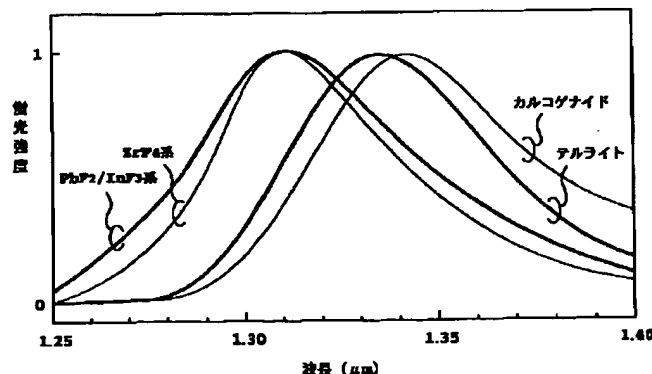
3 アイソレータ

4, 4' WDMファイバカプラ

5 励起光源

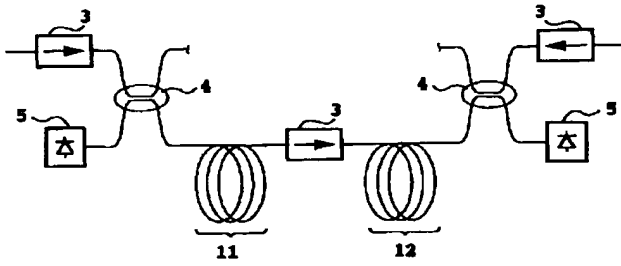
6 減衰器

【図1】

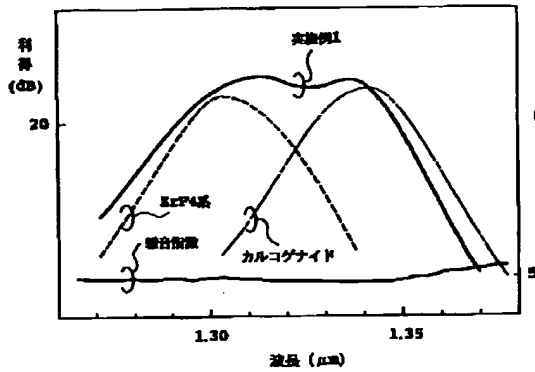




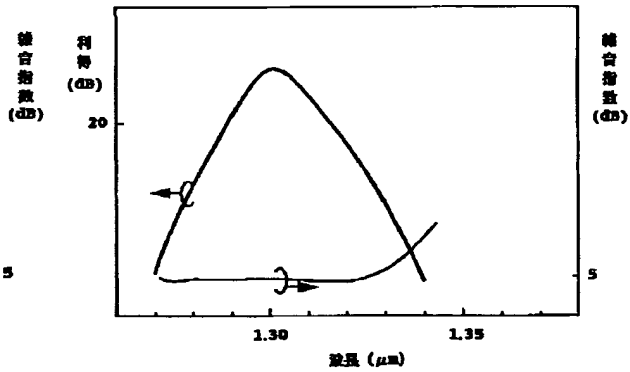
【図2】



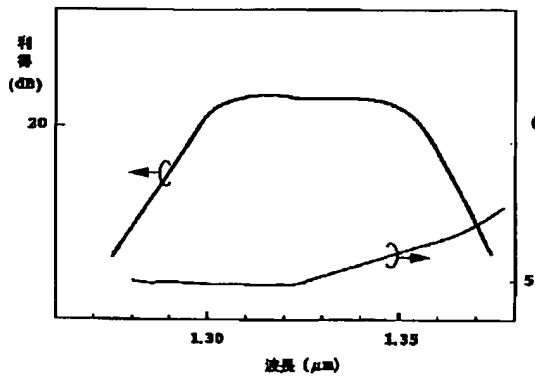
【図3】



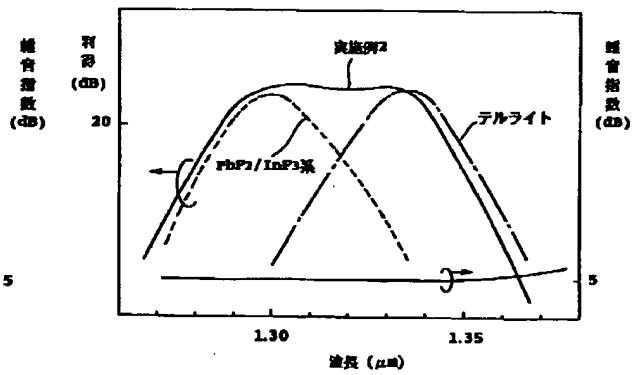
【図4】



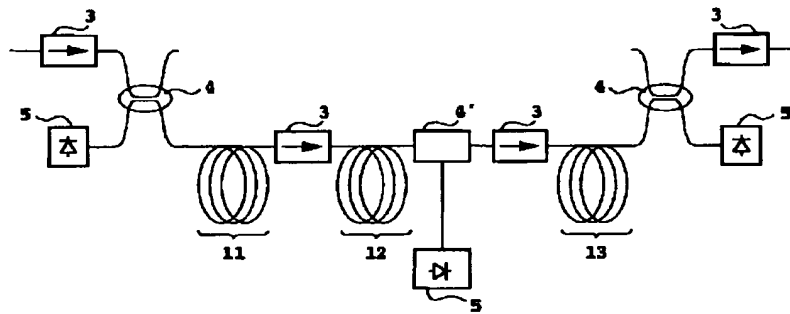
【図5】



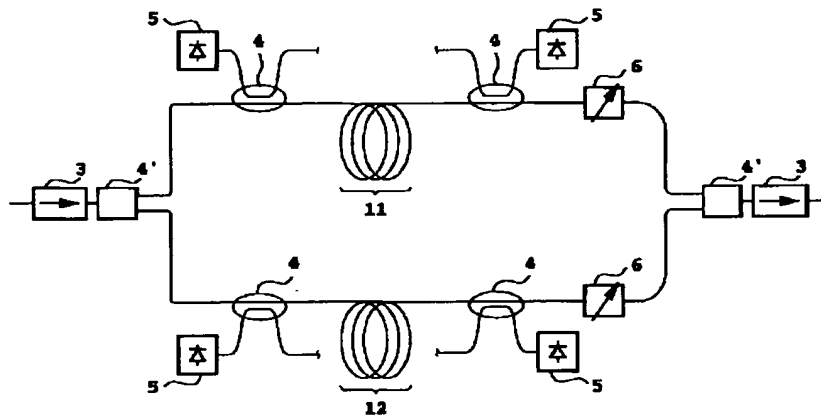
【図6】



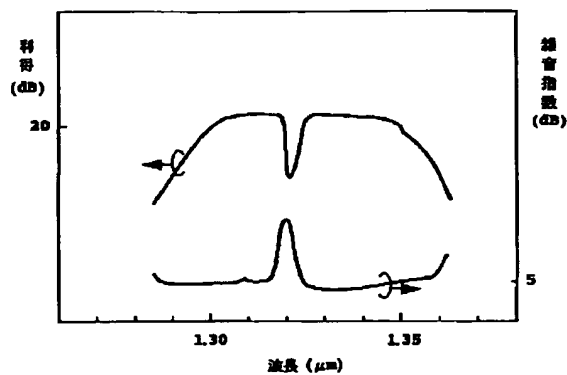
【図7】



【図8】



【図9】



フロントページの続き

(72)発明者 森 淳  
東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本  
電信電話株式会社内

(72)発明者 大石 泰丈  
東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本  
電信電話株式会社内